

## **Исследование изменения поля анизотропии пермаллоевых микрочастиц при их механическом напряжении методами МСМ**

Н.И. Нургазизов<sup>1,2</sup>, Д.А. Бизяев<sup>1</sup>, А.А. Бухараев<sup>1,2</sup>, А.П. Чукланов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, 420029, Казань, Россия  
niazn@mail.ru*

<sup>2</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Казань, Россия*

Методами магнитно-силовой микроскопии исследовалось изменение процесса перемагничивания пермаллоевых частиц во внешнем магнитном поле и трансформация их доменной структуры под воздействием внешнего механического напряжения.

## **Investigation of changing of anisotropy field of permalloy microparticles under mechanical tension by MFM methods**

N.I. Nurgazizov<sup>1,2</sup>, D.A. Biziaev<sup>1</sup>, A.A. Bukharaev<sup>1,2</sup>, A.P. Chuklanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Kazan E. K. Zavoisky Physical -Technical Institute, 420029, Kazan, Russia*

<sup>2</sup>*Kazan Federal University, 420008, Kazan, Russia*

Processes of a magnetization reversal in external magnetic field and of a transformation of domain structure of the permalloy particle under mechanical tension were investigated by magnetic force microscopy methods.

Совместное воздействие внешнего магнитного поля и механического напряжения может существенно снизить энергию, необходимую для изменения магнитного состояния ферромагнитной микро- и наночастицы. Поэтому изучение эффекта Виллари (влияния механических напряжений на магнитные свойства) в микро- и нанодиапазоне вызывает повышенный интерес. Одним из методов, позволяющих исследовать магнитную структуру микрообъектов, является магнитно-силовая микроскопия. В данной работе с ее помощью исследовалось изменение магнитных свойств пермаллоевых (Рy) микрочастиц в зависимости от внешних механических напряжений.

Для проведения измерений были приготовлены образцы, которые представляли собой массив Рy частиц ( $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ ), равномерно расположенных на поверхности кремниевой подложки. Для этого на поверхность подложки в условиях сверхвысокого вакуума методом распыления твердотельной мишени электронным лучом наносился слой Рy толщиной 30 нм. Напыление проводилось через металлическую маску с квадратными отверстиями с размером  $7 \times 7 \text{ мкм}^2$  одновременно на два образца. При этом перед проведением напыления одна из подложек упруго изгибалась за счет установки в специальный держатель. Маска над образцом располагалась таким образом, чтобы направление изгиба подложки было параллельно одной из сторон квадратной маски. После напыления образец извлекался из держателя и, за счет того, что подложка распрямлялась, полученные Рy частицы сжимались вдоль одной из осей. Таким образом формировалось два одинаковых образца: один с напряженными, второй с ненапряженными частицами размером  $7 \times 7 \times 0.03 \text{ мкм}^3$ . Держатель для напыления был изготовлен таким образом, чтобы обеспечить равномерный изгиб подложки, поэтому все напряженные частицы имели одинаковую степень сжатия.

Измерения процесса перемагничивания частиц проводились при помощи СЗМ Solver P47, дополнительно оборудованного электрическим магнитом. Для этого использовались магнитные зонды марки N18/Co-Cr (MikroScience). Измерения были проведены при трех ориентациях внешнего магнитного поля относительно образца: вдоль оси сжатия частиц, перпендикулярно ей и вдоль диагонали частицы (которая является осью легкого намагничивания для ненапряженных частиц). В качестве измеряемого параметра выступала величина внешнего магнитного поля ( $H_a$ ), при которой происходит

переход частицы из многодоменного состояния в однородно намагниченное в направлении действия внешнего поля (для однодоменной частицы эта величина равна величине поля анизотропии частицы в данном направлении). При этом на МСМ изображении на краях частицы появляется характерный черно-белый контраст (Рис. 1в). Сканирующее поле СЗМ позволяло одновременно регистрировать сигнал от 9 частиц. Измерения показали, что переход частиц в состояние с однородной намагниченностью происходит приблизительно при одном значении величины внешнего магнитного поля, что косвенно свидетельствует об одинаковой степени сжатия частиц.

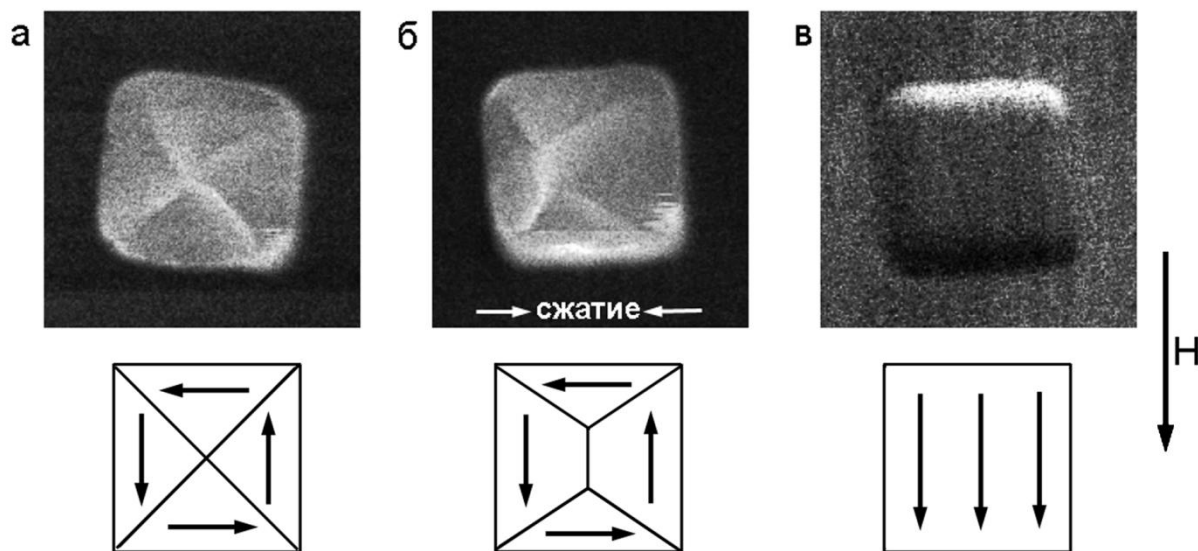


Рисунок 1. МСМ изображения Ру частиц (латеральные размеры частицы  $7 \times 7 \text{ мкм}^2$ ) сверху и соответствующая этому изображению схема распределения локальных магнитных моментов (снизу). Ненапряженная частица (а) в нулевом внешнем магнитном поле. Напряженная частица (б) в нулевом внешнем магнитном поле. Однородно намагниченная во внешнем магнитном поле (направление поля обозначено стрелкой) Ру частица (в).

Распределение магнитных моментов в частице рассчитывалось при помощи программы OOMMF [1]. Затем на основе этого распределения в программе «Виртуальный магнитно-силовой микроскоп» [2] моделировалось МСМ изображение, которое сравнивалось с экспериментальным. Было показано, что несжатые Ру частицы имеют классическую четырехдоменную структуру, с доменами одинаковыми по размерам (Рис. 1а). При механическом сжатии происходит увеличение размера двух доменов с намагниченностью, направленной перпендикулярно оси сжатия, и между ними формируется характерная перемычка (Рис. 1б). Размер перемычки пропорционален степени сжатия частицы. Также было установлено, что происходит существенное уменьшение  $H_a$  частицы в направлении перпендикулярном направлению сжатия частиц. Также наблюдалось увеличение  $H_a$  частицы вдоль диагонали квадрата (ось легкого намагничивания Ру частицы в несжатом состоянии).

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 17-08-00915).

1. M.J. Donahue, D.G. Porter, (<http://math.nist.gov/oommf/>).
2. Д.В. Овчинников, А.А. Бухараев, *ЖТФ* **71**, 85 (2001).